

大跨度市政桥梁抗震设计优化与安全评估方法

颜克基

贵州路桥集团有限公司 贵州毕节

【摘要】大跨度市政桥梁在地震环境下结构响应复杂，易产生重大安全隐患。为提升桥梁抗震性能，提出基于多参数协同优化的抗震设计方法，融合结构体系选型、构造细节改进与隔震减震技术。建立数值分析模型，结合典型地震动输入进行响应分析与性能评估，该优化设计方法能显著提高结构韧性与稳定性，降低关键部位地震损伤风险，为大跨度桥梁抗震安全提供有效技术支撑。

【关键词】大跨度桥梁；抗震设计；优化方法；安全评估；结构响应

【收稿日期】2025 年 1 月 23 日 **【出刊日期】**2025 年 2 月 26 日 **【DOI】**10.12208/j.jer.20250071

Optimization of seismic design and safety evaluation methods for long-span municipal bridges

Keji Yan

Guizhou Road and Bridge Group Co., Ltd, Bijie, Guizhou

【Abstract】The structural response of long-span municipal bridges under seismic conditions is complex, posing significant safety risks. To enhance the seismic performance of these bridges, this study proposes a seismic design method based on multi-parameter collaborative optimization, which integrates the selection of structural systems, improvement of construction details, and seismic isolation and damping technologies. A numerical analysis model is established, and typical seismic input is used for response analysis and performance evaluation. This optimized design method can significantly improve the structural toughness and stability, reduce the risk of seismic damage in critical areas, and provide effective technical support for the seismic safety of long-span bridges.

【Keywords】Long-Span bridges; Seismic design; Optimization methods; Safety evaluation; Structural response

引言

随着城市交通网络不断拓展，大跨度市政桥梁在提升城市通行能力中的作用日益突出。地震作为不可预知的自然灾害，对桥梁结构提出更高的安全性与可靠性要求。传统设计方法在复杂工况下易显局限，难以满足精细化抗震需求。引入多维度优化设计理念，结合新型隔震技术与结构分析手段，已成为桥梁抗震设计的重要方向。探索科学高效的抗震设计与安全评估方法，对保障桥梁运行安全、促进市政工程高质量发展具有重要现实意义。

1 大跨度市政桥梁抗震设计的关键挑战与影响因素

大跨度市政桥梁在地震环境下面临着更为复杂

的结构响应和更高的安全风险。其跨越范围大、自重大、结构体系复杂，导致其对地震荷载极为敏感，尤其在地震引发的水平加速度作用下，桥梁上部结构与下部结构之间的协同运动难以控制，容易造成构件损伤、伸缩缝错位、墩柱剪切破坏甚至整体结构倒塌。桥梁结构的柔度特性较强，结构周期长，易与长周期地震波形成共振，从而加剧地震响应。

影响大跨度桥梁抗震性能的主要因素包括地震动输入特性、桥梁结构形式、构造细节、地基条件及构造材料性能等。在地震动方面，近断层脉冲型地震动能量集中、频率低、持续时间短，对结构产生较强的冲击作用，易引发墩顶位移超限和桥面错位。而结构形式对抗震性能具有决定性影响，不同的桥

型(如连续梁桥、斜拉桥、悬索桥)在受力机制、变形能力与耗能方式上存在显著差异^[1]。连续梁桥因结构刚度相对集中,易出现局部薄弱环节;而悬索桥虽具备良好的变形能力,但主缆锚固系统在地震作用下承受极高荷载,需要特殊设计以确保安全性。构造细节设计是抗震性能优化的关键,伸缩缝、支座、墩柱连接部位是地震易损部位,若设计不当极易成为破坏起点。结构冗余度较低或节点连接刚性不足时,抗震韧性将显著下降。地基土层条件同样不容忽视,软弱土层在地震波传播过程中可能放大地震动强度,引发液化现象,加剧桥墩倾斜与基础破坏风险。

桥梁自重大和构件长细比高也导致其在地震作用下稳定性差。长悬臂结构受地震激励时可能产生明显的自由振动响应,加大主梁变形,影响整体稳定性^[2]。在实际工程中,不合理的结构布置或过于复杂的结构形态也会导致力学路径不明确,增加非线性响应的不确定性,从而降低抗震可靠性,在进行大跨度市政桥梁抗震设计时,必须充分识别上述关键问题和影响因素,以实现结构全生命周期内的抗震安全目标。

2 多参数协同优化在桥梁抗震设计中的应用路径

在抗震设计日益精细化的背景下,传统基于静力分析和经验构造法的设计方法已难以满足复杂工况下大跨度桥梁的抗震需求。多参数协同优化设计方法应运而生,通过在设计初期对影响抗震性能的关键参数进行综合协调和科学调整,从整体层面提升结构系统的抗震能力。该方法不仅注重结构承载力与刚度的配置平衡,更强调构件韧性、变形协调性及结构体系整体协同效应。

多参数优化设计需从结构体系层级出发,考虑桥型选择、桥墩高度与刚度、支座布置、构件配筋比等多维因素之间的耦合关系,通过优化桥墩截面形状和高宽比,可以在控制自振周期的同时提高其抗剪能力与稳定性^[3]。在主梁设计方面,可通过截面形式调整及材料分布优化,实现质量与刚度的合理匹配,从而减小地震响应,材料性能参数如混凝土强度等级、钢筋屈服强度、构件延性指标等均应纳入优化框架,确保结构具备足够的能量耗散能力。构造细节优化是多参数设计的核心内容之一,对于关

键连接部位,如墩梁连接、支座区和伸缩缝区域,应通过设置屈服机制或引入延性构件,提高耗能效率与延展性^[4]。结构冗余度配置亦不容忽视,合理设置次结构或附属构件可在主结构失效前提供替代力路径,提高整体系统的稳健性,应结合布置优化,确保各关键构件的破坏模式可控,避免脆性破坏扩展导致整体失稳。

多目标优化算法的引入为桥梁抗震设计提供了技术支撑,采用遗传算法、粒子群算法等智能优化方法,可以在多参数、多约束条件下高效搜索最优解,兼顾经济性与安全性。基于性能目标的抗震设计理念应贯穿整个优化过程,以满足不同设防水平下桥梁的功能恢复能力与结构完整性要求^[5]。抗震性能分级目标可依据震后可通行性、修复成本及结构残余变形等指标进行量化,实现设计目标与实际运行需求的一致性,多参数协同优化方法强调设计逻辑的系统性与结构性能的全局最优,是实现大跨度桥梁高水平抗震设计的有效手段。在新一代桥梁设计标准和高性能建材发展的推动下,该方法将在市政桥梁领域展现更广泛的应用前景。

3 基于数值分析的抗震响应模拟与安全评估方法构建

在大跨度市政桥梁抗震设计过程中,定量评估结构在地震作用下的响应特性与安全水平是实现精准设计的前提。基于数值分析的抗震模拟方法,能够在虚拟环境中再现桥梁结构的非线性地震响应过程,为构件性能评估与设计参数校核提供科学依据。采用有限元建模技术,可对不同桥型结构建立三维动力学模型,涵盖主梁、桥墩、基础、支座及连接件等全部关键构件,实现整体系统响应的动态追踪。

数值模拟中,地震动输入是决定分析准确性的核心因素。应选择具有代表性的实际地震记录或基于场地条件合成的人工地震波,确保涵盖多种振动特征与频率成分。通过输入多组地震波,可评估结构在不同震级、方向与持续时间下的响应敏感性,从而识别潜在薄弱环节^[6]。动力时程分析作为主要方法,可详细捕捉结构加速度、速度、位移及内力演化过程,反映构件非线性行为与滞回耗能特性。安全评估方法的建立需基于结构性能水平的定量化描述。通过设置性能目标如“基本无损”、“可修复”、“濒临倒塌”,结合位移角、塑性铰发展程度、支座滑移

量等关键指标,实现抗震能力分级评估。采用弹塑性分析手段可揭示结构各阶段的受力转化与变形机制,辅助判断是否达到性能目标。结构可靠度分析可结合地震作用概率与构件强度不确定性,评估结构达到失效状态的风险水平。

对于多跨桥梁或异质结构体系,还需引入结构响应协调性评价。桥墩之间的变形差异、桥梁与基础之间的位移协调性等因素均影响整体抗震性能,应通过参数化分析与敏感性评估明确其影响程度^[7]。为提高评估效率,可构建多工况分析平台,融合地震动、温度、荷载等多重作用,模拟桥梁在复杂环境下的综合响应。数值分析与安全评估结果应服务于设计优化与施工控制。通过对比不同设计参数下的地震响应差异,筛选性能最优的结构方案。将评估结果反馈至构造设计阶段,可有效规避设计缺陷,提升抗震冗余,基于模拟结果形成的抗震性能数据库,还可用于桥梁运行期状态监测与灾后快速评估,支撑结构全寿命周期的安全保障体系构建。

4 新型隔震与减震技术在桥梁结构中的集成策略

随着抗震工程技术的持续发展,传统的抗震设防已逐步向隔震与减震技术融合转变。在大跨度市政桥梁结构中引入高性能隔震与减震装置,可有效降低地震能量传递、控制结构振动响应,提高桥梁在地震作用下的功能保持能力。当前应用较广的隔震技术主要包括铅芯橡胶支座、滑移摩擦支座、高阻尼橡胶支座等,通过设置在桥墩与上部结构之间形成柔性连接,延长结构自振周期、削弱高频振动输入。

减震装置如液体阻尼器、金属屈服耗能器与粘滞阻尼器等,通过耗散输入能量实现对结构响应的主动控制。这些装置一般布置于墩梁连接处、支座区或主梁内部关键节点,配合构件变形路径精准设计,形成多级耗能体系,提高结构耐震韧性。为确保设备工作效能,应根据桥梁动力特性与地震频谱特征选型匹配,实现结构周期与装置控制频率的协同调整^[8]。集成策略的构建需基于系统协调与功能优化原则,考虑装置与结构自身特性的耦合效应。隔震装置的刚度与阻尼比需合理配置,以防结构漂移量过大影响通行安全。减震装置需与构件受力路径一致,避免产生次生集中内力。应预留足够变形空

间并加强连接锚固,防止地震过程中装置失效或脱落。

技术集成还需结合施工可行性与维护简便性,优选结构兼容性强、施工安装便捷的装置形式。为提升集成效率,可构建参数化设计模型,实现隔减震设备位置、数量、参数的协同布置。对于关键节点区域,通过构造一体化设计,将隔震层与基础、墩柱、桥台构件相结合,形成整体性能最优的协同体系。性能反馈机制亦不可或缺^[9]。在使用过程中,应通过传感器监测、结构健康评估等手段,实时掌握隔减震系统工作状态,并在必要时进行维护或更换。新型智能材料与可调阻尼技术的引入,拓展了桥梁抗震技术的边界。未来可通过人工智能算法与大数据平台,对隔减震系统进行自适应调节,实现桥梁抗震性能的动态最优控制。

5 结语

大跨度市政桥梁在地震作用下结构响应复杂,抗震设计需注重体系优化与性能控制。通过识别关键影响因素,构建多参数协同优化路径,并结合数值模拟与安全评估方法,可有效提升桥梁抗震能力。集成新型隔震与减震技术,为结构韧性与运行安全提供支撑。构建科学、系统、高效的抗震设计与评估体系,是提升桥梁抗震水平、保障市政基础设施安全运行的重要方向。

参考文献

- [1] 万程磊.广东某装配式市政桥梁减隔震设计分析[J].工程技术研究,2024,9(07):179-182.
- [2] 杜坤鹏.高烈度区地铁车站与市政桥梁合建技术研究[C]//中国城市科学学会数字城市专业委员会轨道交通学组,中铁十六局集团有限公司,中城科数智慧城市规划设计研究中心.智慧城市与轨道交通 2023.中国铁路设计集团有限公司,2023:126-130.
- [3] 黄翰霄,韦良文,鄢玉鑫.考虑地层影响的市政桥梁与地铁车站合建方案研究——以重庆大学城南站合建工程为例[J].隧道建设(中英文),2022,42(S2):345-351.
- [4] 刘宝柱.市政桥梁结构抗震设计与设防措施[J].运输经理世界,2022,(17):107-109.
- [5] 李建中.高速铁路桥梁抗震设计[M].中国铁道出版社:202204.368.

- [6] 崔明伟.城市市政桥梁抗倾覆设计[J].工程建设与设计,2021,(22):83-85.
- [7] 徐蕾蕾.市政桥梁抗震性能化设计[J].建筑技术开发,2021,48(12):63-64.
- [8] 张宏杰.市政桥梁项目减隔震设计要点探微[J].科技创新与应用,2020,(15):96-97.

- [9] 李伟.市政桥梁设计中抗震性能化设计分析[J].建筑技术开发,2020,47(09):116-117.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

